

文章编号 1004-924X(2014)01-0220-08

简单图像的快速聚焦

陈芳^{1*}, 张存继¹, 韩延祥¹, 史金飞²

(1. 东南大学机械工程学院, 江苏南京 211189;

2. 南京工程学院, 江苏南京 211167)

摘要: 为了有效地实现简单图像的快速高精度自动聚焦, 提出了一种新的快速聚焦算法。首先在相机进行调焦时自动获取系列零件图像, 并记录各图像对应的位置; 然后计算每张图像中目标边缘的灰度变化跨度值, 从中找到跨度值最小的图像, 即为最清晰图像; 最后将其所在位置反馈给硬件驱动系统, 实现自动聚焦。用新算法分别对不同形状和不同材料的零件, 在添加椒盐噪声和没有添加噪声的情况下进行实验, 并与计算量小的几种经典最优聚焦函数做了对比试验。结果表明, 用新算法对简单图像进行聚焦比常用的最优聚焦函数更敏锐, 单峰性更好, 抗噪能力更强, 而且速度比最快的绝对梯度函数快 30% 以上。因此, 新算法在拍摄简单场景时, 鲁棒性好, 可以更好地实现快速聚焦。

关键词: 自动聚焦; 目标边缘; 跨度值; 聚焦函数; 鲁棒性

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142201.0220

Fast focus on simple images

CHEN Fang^{1*}, ZHANG Cun-ji¹, HAN Yan-xiang¹, SHI Jin-fei²

(1. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

* Corresponding author, E-mail: fchen@seu.edu.cn

Abstract: To quickly realize the autofocus of a simple image and further improve the efficiency of automated part fabrication, a novel fast focusing algorithm was proposed according to the characters of images with single and clear backgrounds and foregrounds. Firstly, a series of part images including their position information were acquired. Then, all variance grey span values of target edges in each image were calculated automatically and the minimum span value of the clearest image was found quickly. Finally, the position information of the clearest image was feed backed to a hardware driving system to complete the autofocus. An experiment on several parts with different shapes or materials was performed and obtained results were compared with that of the classic optimal focus function. The experimental results on those images added with salt-and-pepper noises demonstrate that the new algorithm is not only more sensitive but also has stronger unimodality and stronger anti-noise ability than those of classic optimum algorithms. Moreover, its computing speed is more than 30% faster than that

收稿日期: 2013-05-13; **修订日期:** 2013-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51275090); 江苏省科技成果转化专项资金资助项目 (No. BA2010093); 江苏省科技支撑计划资助项目 (No. BE2008081)

of the fastest absolute gradient function. It concludes that the novel algorithm is robust and can be better used for a fast focus on simple scenes.

Key words: autofocus; target edge; span value; focus function; robustness

1 引言

随着自动化生产的发展,视觉技术在目标定位、产品表面质量检测^[1-3]、零件尺寸测量^[4-6]和产品辨识分类等诸多工业领域的研究和应用越来越广泛。而图像自动聚焦技术是快速获取高质量图像,实现自动化必不可少的过程,是计算机视觉的核心技术之一。国内外的学者们在这方面做了大量的研究工作,在测距调焦和图像自动聚焦判别函数的研究上取得了大量成果,使得聚焦技术越来越成熟和完善。

测距调焦是通过测定的物距来调整对焦机构,从而完成图像聚焦,如超声波反射时间测距法、红外线反射能量法和像偏移法、以及基于光电位置敏感器(Position Sensitive Detector, PSD)的激光三角测距法等。这种测距调焦方法的系统结构相对比较复杂、成本高。而基于图像处理理论的图像自动聚焦判别函数,是通过已获取的图像质量来判断图像聚焦或离焦的程度,再将相关信息反馈给成像系统,最终捕获聚焦的高质量图像。这种方法系统结构相对简单,在降低成像系统成本的情况下可以获得清晰图像。

经典的图像聚焦函数分别为基于空域、频域和图像熵的方法。基于空域的方法是通过图像的灰度差或灰度梯度等来描述图像的清晰程度,计算量小,应用广泛,但抗噪性能不是很理想,常用的函数包括灰度差分绝对值之和(SMD)函数、灰度方差函数、灰度均方差函数、最大灰度梯度函数、绝对梯度函数、平方梯度函数、Roberts算子梯度函数、Sobel算子梯度函数、Brenner函数、Laplacian函数、Tenengrad函数等。文献[7]分别从精度、抗噪能力、峰值点(除最大值点)的数量和宽度等方面对聚焦函数进行评估,得知方差函数、标准方差函数、绝对梯度函数、平方梯度函数、Brenner函数、Tenengrad函数及自相关函数为最优聚焦函数。基于频域的方法是通过时频变换,

由图像的高频成分来评价图像的清晰程度,这类方法计算量较大,耗时多,对噪声敏感,应用相对较少,通常有离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)、离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)、小波变换^[8-9]等。基于图像熵的方法是根据图像灰度熵的大小来评价图像的清晰程度,当灰度熵最小时,图像最清晰,但其调焦曲线的灵敏度和信噪比都不高,计算量相对较大,对环境的稳定性要求也较高,所以实际应用较少^[10]。

此外,Liu^[11]提出基于小波变换的新的聚焦算法,该方法具有较好的聚焦稳定性和可行性,只是耗时较多。文献[12]提出基于互相关的算法,其聚焦曲线波动少,但曲线不够尖锐陡峭,灵敏度低。文献[13]中提出基于加权四邻域像素灰度相关性的二次多项式聚焦函数,其灵敏度和信噪比有所提高。文献[14]提出基于二阶导数的聚焦新算法,但主要用于显微镜聚焦。文献[15]提出基于图像区域对比度的清晰度评价新方法,其抗噪力强,但没有时间优势。文献[16-17]分别改进了灰度差分法来实现图像的自动聚焦。还有更多关于聚焦函数的研究,这里不一一列举。总之,理想的聚焦函数应具备无偏性、单峰性、高信噪比和计算量小等特点。

由于在视觉工业应用领域,定位、检测和测量的对象通常比较单一,背景也比较简单,并且在应用中,工业相机有一部分是人工手动调焦的,主要靠人眼观察来定性判别是否聚焦,这种调焦方法相对比较粗糙,带有主观性,不利于实现自动化,不具有自动聚焦的高精度和实时性。因此,针对这些情况,本文提出一种能有效实现简单图像的快速高精度自动聚焦的算法,以便为后续的处理提供高质量图像。

2 常用的聚焦评价函数

下面是空域经典的几种最优聚焦函数。对于

计算量大或灵敏度不高的其它聚焦函数在这里不做讨论。

(1) 方差函数

方差函数计算量小,定义如下:

$$f(I) = \sum_x \sum_y [I(x,y) - \mu]^2, \quad (1)$$

其中: $\mu = \frac{1}{RC} \sum_x \sum_y I(x,y)$,

式中: $I(x,y)$ 为图像在点 (x,y) 处的灰度值(以下各式相同), μ 为图像像素灰度值的平均值, R,C 分别为聚焦窗口的行、列数。

(2) 绝对梯度函数计算公式如下:

$$f(I) = \sum_x \sum_y |I(x+1,y) - I(x,y)|. \quad (2)$$

(3) 平方梯度函数定义如下:

$$f(I) = \sum_x \sum_y \{ [I(x+1,y) - I(x,y)]^2 + [I(x,y+1) - I(x,y)]^2 \}. \quad (3)$$

(4) Brenner 函数的公式如下:

$$f(I) = \sum_x \sum_y [I(x+2,y) - I(x,y)]^2. \quad (4)$$

(5) Tenengrad 函数的计算公式如下:

$$f(I) = \sum \sum (H^2 + V^2), \quad (5)$$

其中: $H = I * G_{Hor}$, $V = I * G_{Ver}$, I 为图像灰度值矩阵, $*$ 是卷积运算, G_{Hor} 为水平方向边缘检测算子, G_{Ver} 为垂直方向边缘检测算子:

$$G_{Hor} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_{Ver} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

3 简单图像的快速聚焦法

3.1 简单图像的快速聚焦原理

聚焦的清晰图像包含更多的细节信息,相应的在频域具有更多的高频分量;在空域聚焦目标的边缘最锐利时,灰度值变化最剧烈,即灰度梯度最大,对应的灰度变化跨度达到最小。根据这个原理,直接搜索目标边缘,分别计算图像在离焦和聚焦时的目标边缘灰度跨度,结果显示,当跨度取得最小值时,梯度最大的位置就是图像聚焦位置。图 1 和图 2 分别是新算法的清晰度判别流程总图

和边缘跨度计算流程子图。

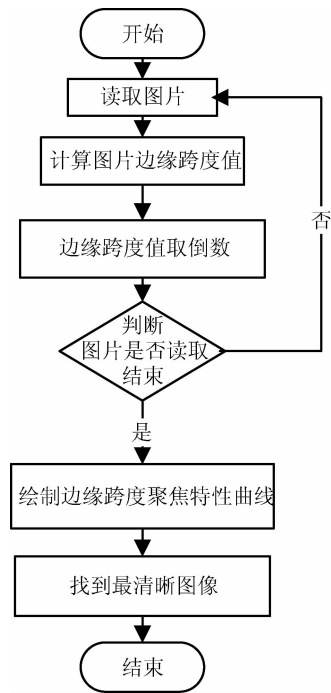


图 1 图像清晰度判别流程

Fig. 1 Flowchart of discriminating image sharpness

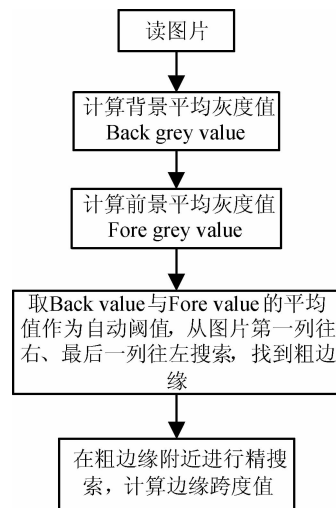


图 2 边缘跨度计算流程

Fig. 2 Flowchart of computing edge span

当相机调焦时,按一定步距自动捕获系列图像,并记录下对应的位置,然后计算每张图像的边缘跨度。首先计算背景平均灰度值:

$$B_g = \frac{1}{M_B * N_B} \sum_x \sum_y I_B(x,y), \quad (6)$$

式中: B_g 表示背景平均灰度值; $[M_B, N_B]$ 表示所取

背景窗口为 M 行 N 列; $I_B(x, y)$ 为图像在背景点 (x, y) 处的灰度值。然后计算前景平均灰度值:

$$F_g = \frac{1}{M_F \times N_F} \sum_x \sum_y I_F(x, y). \quad (7)$$

式中: F_g 表示前景平均灰度值, $[M_F, N_F]$ 表示所取前景窗口为 M 行 N 列; $I_F(x, y)$ 为图像在前景点 (x, y) 处的灰度值。

设定 $\bar{I} = \frac{B_g + F_g}{2}$ 为自动阈值。

从图像灰度值的左边第一列往右搜索, 右边最后一列往左搜索, 找到第一个 $I(x_0, y_0) > \bar{I}$ 的点, 将该点 (x_0, y_0) 所在位置记为粗边缘点。以该点为中心分别向四周拓展, 得到 $2I+1$ 行, $2J+1$ 列的精搜索窗口 S :

$$S = [x_0 - I, x_0 + I; y_0 - J, y_0 + J]. \quad (8)$$

在精搜索区域 S 内找到灰度值 $I(x, y)$ 满足下列条件的像素点, 并计算像素点的个数, 即可得到边缘跨度。

当 $B_g < F_g$ 时, 有:

$$B_g + \delta < I(x, y) < F_g - \delta \text{ 或 } I(x, y) > F_g + \sigma$$

其中: δ, σ 为设定的阈值。 $I(x, y) > F_g + \sigma$ 的情况适用于目标边缘出现泛白异常, 灰度值大于前景时, 这主要源于反光、光照不均匀等多因素造成的灰度值突变现象。

同理, 当 $F_g < B_g$ 时, 有:

$$F_g + \delta < I(x, y) < B_g - \delta \text{ 或 } I(x, y) > B_g + \sigma.$$

此时对求得的每幅图的边缘跨度值取倒数, 由 Matlab 编程绘制聚焦曲线, 曲线顶点即为跨度最小值点。比较所有的跨度值, 最小值对应的图像就是最清晰图像, 对焦系统据此返回该图像所在位置, 实现自动聚焦。

3.2 窗口选择

由于图像聚焦的速度和效果与聚焦窗口的大小及位置的选择密切相关, 大部分工业应用中, 对于简单零件进行测量检测时, 要尽量让目标充满视野。上述算法均优先选择分别从整幅图像的最左和最右(或最上和最下)搜索边缘, 找到边缘的初步位置后, 再根据需要在边缘区设定精搜索的窗口大小, 边搜索边计算边缘跨度。这样, 所取窗口的位置根据目标零件边缘距离整个视野边缘的远近而动态变化。零件边缘越靠近视野边缘, 对应的搜索窗口就越小, 则搜索时间越短, 聚焦速度也越快, 反之则慢。对于常用的取中心窗口或在上下左右 4 个黄金分割位置取窗口的方法, 在单一图像的聚焦中, 作为次优选择窗口, 可以通过对

话框作为备选方案备用。

4 聚焦实验与结果

4.1 不同聚焦函数的性能比较

根据上述新算法, 选用哈尔滨刀具刃具厂生产的系列标准量块及其它不同形状和材质的零件进行聚焦实验, 并与上述经典的最优聚焦函数做对比实验。图 3 是部分实验零件图。

图 4 是其中一个量块聚焦过程所获取的系列图像。

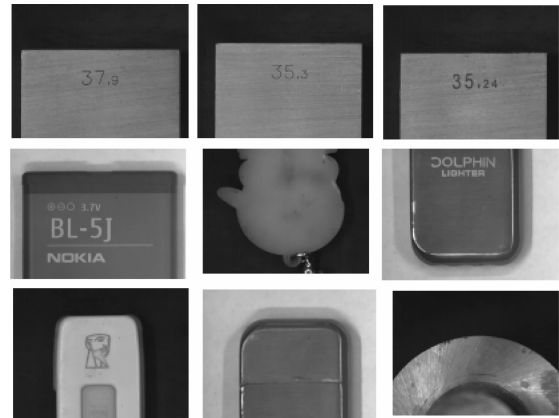


图 3 实验用不同零件
Fig. 3 Different parts for test

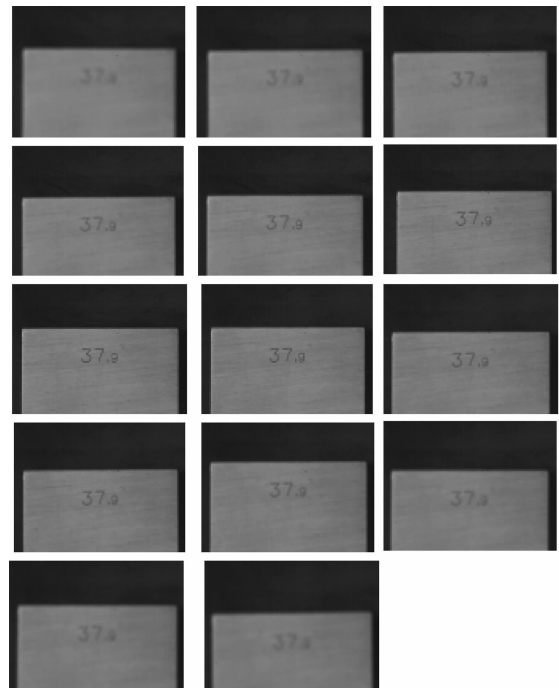


图 4 量块的聚焦和离焦图像
Fig. 4 Focus and defocus images of gauge block

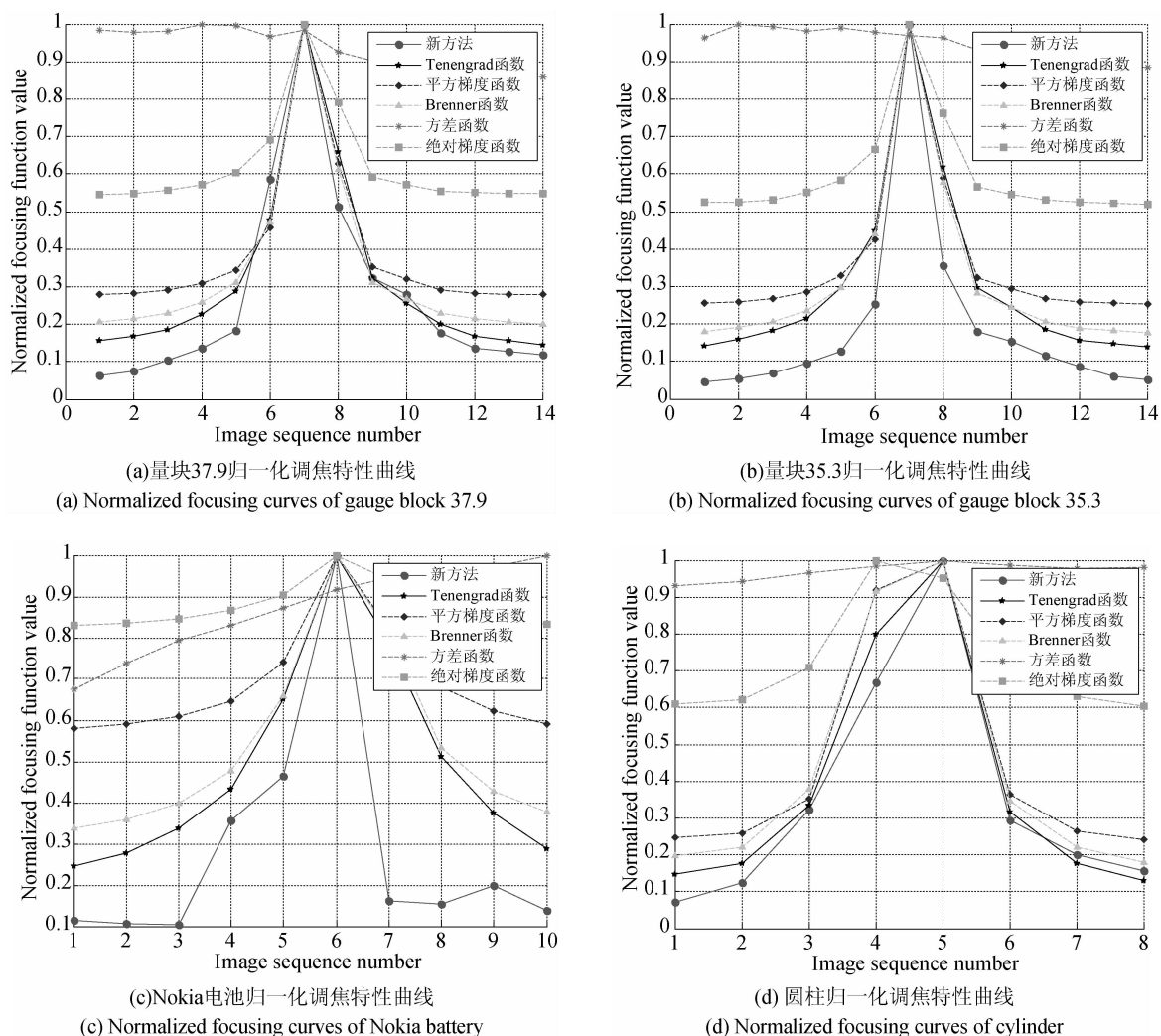


图 5 不同算法的聚焦曲线

Fig. 5 Focusing curves of different algorithms

图 5 所示是图 3 中 37.9 的量块、35.3 的量块、Nokia 电池和金属圆柱的归一化聚焦特性曲线。

由图 5 可知,量块的第 7 张图最清晰,对应于图 4 第 3 行最左侧的图像,实验结果与实际完全吻合。其余的零件聚焦曲线与实际也完全吻合,曲线的峰值点对应最清晰的聚焦图像。在近焦区,对于不同零件,新算法曲线更尖锐陡峭,单调性更好,更灵敏,稳定性更好。这说明新算法对简单图像(背景和零件都比较单一)具有普适性。表 1 是上述实验中不同算法聚焦所消耗的时间。

表 1 不同算法的聚焦时间

Tab. 1 Focusing time of different algorithms (s)

零件/(mm)	量块 37.9	量块 35.3	Nokia	圆柱
新方法	0.202 8	0.224 7	0.181 3	0.118 8
方差函数	0.417 5	0.382 2	0.519 1	0.232 8
绝对梯度函数	0.399 8	0.343 3	0.286 3	0.223 3
平方梯度函数	0.590 6	0.545 1	0.432 2	0.338 9
Brenner 函数	0.408 4	0.352 6	0.292 5	0.237 4
Tenengrad 函数	1.266 3	1.452 0	0.927 8	0.775 3

由上表可知,本文提出的算法耗时最少,速度比其余几种方法中最快的绝对梯度函数提高了

30%以上。因此,新算法能更好地满足快速聚焦要求,这对提高在线作业的效率有实际意义。

4.2 添加噪声的聚焦实验

将上述图像加上椒盐噪声后,如图 6 所示,再进行上述实验,聚焦曲线如图 7 所示:

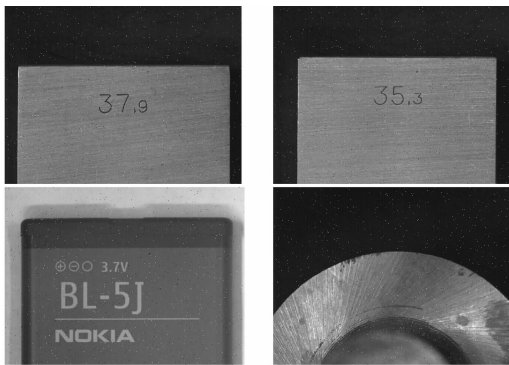
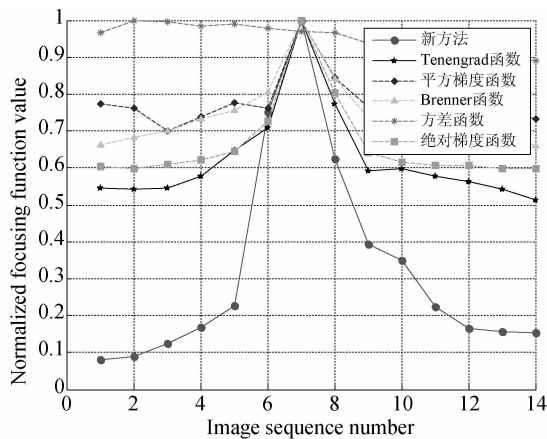
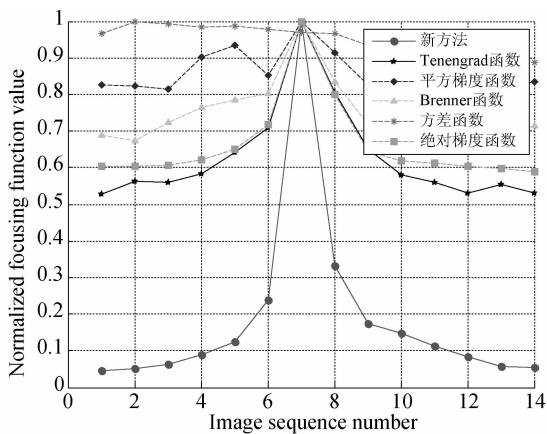


图 6 添加椒盐噪声的图像

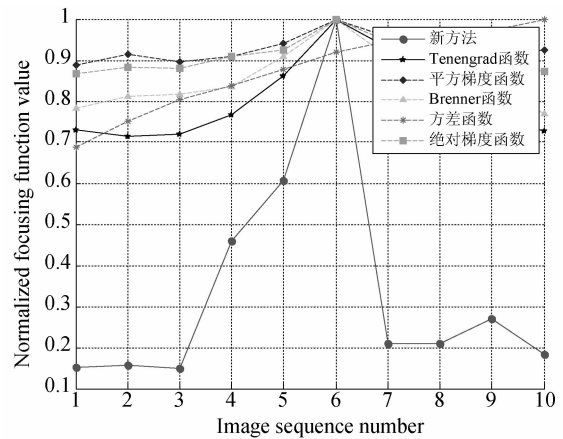
Fig. 6 Images with salt-and-pepper noise



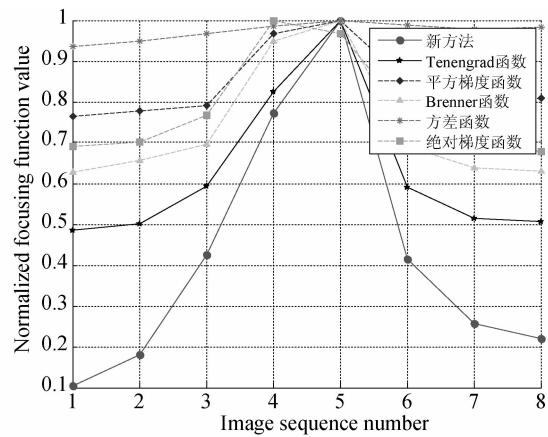
(a)量块37.9归一化调焦特性曲线(加椒盐噪声)
(a)Normalized focusing curves of gauge block 37.9 with salt-and-pepper noise



(b)量块35.3归一化调焦特性曲线(加椒盐噪声)
(b)Normalized focusing curves of gauge block 35.3 with salt-and-pepper noise



(c) Nokia电池归一化调焦特性曲线(加椒盐噪声)
(c)Normalized focusing curves of Nokia battery with salt-and-pepper noise



(d)圆柱归一化调焦特性曲线(加椒盐噪声)
(d)Normalized focusing curves of cylinder with salt-and-pepper noise

图 7 加噪声时不同算法的聚焦曲线

Fig. 7 Focusing curves of image with noise by using different algorithms

由图 7 可知,新算法添加椒盐噪声后,聚焦曲线变化较小,曲线依然比较锐利陡峭,这说明算法对噪声不敏感,有很强的抗噪能力。而其它几种最优算法的聚焦曲线发生了明显改变,曲线变得平缓,这说明他们对噪声敏感,抗噪能力弱。

5 结 论

本文首次提出直接根据图像目标边缘的灰度跨度来判定图像的清晰度。当跨度取得最小值时,边缘最锐利,梯度最大,此处就是图像聚焦位置。该算法对背景和前景单一的平面场景有非常好的聚焦效果。实验结果表明,该调焦评价函数

比经典的最优聚焦函数单调性好、灵敏度高、抗干扰能力强,具有良好的鲁棒性和可重复性,聚焦速度也提高了 30%。新算法不仅可用于工业领域简单图像的聚焦判定,对于农业、医学和其他领域

的简单图像都适用,确切地说只要便于自动取阈值的简单平面场景,本算法就适用。但对画面复杂的场景,如人物山水风景等,由于不能自动选择阈值,该算法不再适用。

参考文献:

- [1] SHEN H, LI S X, GU D Y, *et al.*. Bearing defect inspection based on machine vision [J]. *Measurement*, 2012, 45(4): 719-733.
- [2] SHAHABI H H, RATNAM M M. Noncontact roughness measurement of turned parts using machine vision [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2010, 46(1-4): 275-284.
- [3] 王小鹏, 刘志华, 陈天宁. 透明材料微小器件键合质量检测系统设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 69-76.
- WANG X P, LIU ZH H, CHEN T N. Design of bonding quality testing system for micro device made of transparent materials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 69-76. (in Chinese)
- [4] 刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 126-134.
- LIU J W, LIANG J, LIANG X H, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension workpieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 126-134. (in Chinese)
- [5] GADELMAWLA E S. Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears [J]. *Measurement*, 2011, 44(9): 1669-1678.
- [6] PARK J B, LEE J G, LEE M K, *et al.*. A glass thickness measuring system using the machine vision method [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(5): 769-774.
- [7] SUN Y, DUTHALER S, NELSON B J. Auto-focusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2004, 65(3): 139-149.
- [8] VU P V, CHANDLER D M. A fast wavelet-based algorithm for global and local image sharpness estimation [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(7): 423-426.
- [9] ZONG G H, SUN M L, BI S S, *et al.*. Research on wavelet based autofocus evaluation in micro-vision [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2006, 19(3): 239-246.
- [10] 李明明, 王新赛, 李坚. 基于图像处理的自动聚焦清晰度函数比较研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(增刊): 244-248.
- LI M M, WANG X S, LI J. Comparative study on the auto-focus definition function based on the image processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(Supp.): 244-248. (in Chinese)
- [11] LIU Y P, JIN J, WANG Q, *et al.*. Phases measure of image sharpness based on quaternion wavelet [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2013, 34(9): 1063-1070.
- [12] 董代, 刘荣, 孙明磊, 等. 基于互相关的自动聚焦方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(3): 306-310.
- DONG D, LIU R, SUN M L, *et al.*. Auto-focusing algorithm based on cross correlation [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(3): 306-310. (in Chinese)
- [13] 王倩, 宋恩民, 许向阳, 等. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 166-171.
- WANG Q, SONG E M, XU X Y, *et al.*. Auto-focusing function for microscope image based on weighted neighborhood correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 166-171. (in Chinese)
- [14] RUDNAYA M E, TER MORSCHE H G, MAUBACH J M L, *et al.*. A derivative-based fast autofocus method in electron microscopy [J]. *J Math Imaging Vis.*, 2012, 44(1): 38-51.
- [15] 张亚涛, 吉书鹏, 王强锋, 等. 基于区域对比度的图像清晰度评价算法[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 293-299.
- ZHANG Y T, JI SH P, WANG Q F, *et al.*. Definition evaluation algorithm based on regional contrast [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 293-299. (in Chinese)
- [16] 张旭东, 王景峰, 程永强. 多功能一体化模拟摄像机系统设计[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(1): 116-120.

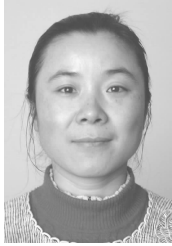
ZHANG X D, WANG J F, CHENG Y Q. Design of multifunctional and integrative analog camera system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(1): 116-120. (in Chinese)

[17] 张博,张刚,程永强. 具有自动聚焦功能的视频处

理器的设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3): 396-400.

ZHANG B, ZHANG G, CHENG Y Q. Design of video processor with auto-focusing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3): 396-400. (in Chinese)

作者简介:



陈芳(1969—),女,江苏南通人,博士研究生,讲师,1995年、2002年于东南大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉及图像处理方面的研究。
E-mail: fchen@seu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)